

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO

TEMA:
DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN LAZO
CERRADO PARA LOS HORNOS ROTATIVOS DE LA EMPRESA
FRIGOMACZ CIA. LTDA.

AUTOR:
ZURITA CANCHIGNIA ALEX VINICIO

DIRECTOR:
ROJAS URBANO JAVIER ARTURO

Quito, febrero del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Alex Vinicio Zurita Canchignia con documento de identificación N° 1724352297 manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación titulado “DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN LAZO CERRADO PARA LOS HORNOS ROTATIVOS DE LA EMPRESA FRIGOMACZ CIA. LTDA.” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Electrónico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, febrero del 2020



Alex Vinicio Zurita Canchignia

CI: 1724352297

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “DESARROLLO DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN LAZO CERRADO PARA LOS HORNOS ROTATIVOS DE LA EMPRESA FRIGOMACZ CIA. LTDA.” realizado por Alex Vinicio Zurita Canchignia, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2020



Javier Arturo Rojas Urbano

CI: 020189802-0

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a la Virgen del Quinche por cuidarme a todo momento, por bendecirme con una gran familia y por haberme dado las fuerzas necesarias para culminar mi carrera.

Al angelito que se fue antes de verme cumplir esta meta, Emily Betsabeth no sabes cuánto te echo de menos mi bebé.

A la persona más importante de mi vida Mami Rosita por ese amor incondicional que solo una madre puede dar, por esperarme siempre con un plato de comida, por preocuparse en que tenga ropa limpia que mudar, por reprenderme las veces que fueron necesarias, gracias a usted soy una persona de bien.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres Papi José y Mami Charito por haberme enseñado desde pequeño a trabajar, por hacerme entender que las cosas se valoran solo cuando son conseguidas con esfuerzo. El estudio y el haberme dado una profesión es la mejor herencia que me han podido dejar.

A mis hermanas Jenny, Diana, Paola, Clara, a mis hermanos Juan Carlos, Richard y Bryan por su cariño y comprensión, por regalarme una familia numerosa con la que siempre puedo contar.

A mi novia Vero por haberme motivado a terminar la carrera, gracias por permanecer junto a mí en los peores momentos, ahora que termino esta etapa, podremos realizar todos esos sueños que juntos tenemos.

Quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana, por haberme educado en valores, a ser solidario y a compartir con las personas que menos tienen. A mi tutor al Ing. Javier Rojas Urbano por haber compartido sus conocimientos y experiencias para el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN	xi
CAPÍTULO 1.....	1
ANTECEDENTES	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3 OBJETIVOS	1
1.3.1 Objetivo General.....	1
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 HORNEADO DE PAN.....	3
2.2 HORNO	3
2.3 CLASIFICACIÓN DE HORNOS PARA HORNEADO DE PAN	4
2.3.1 Horno de gaveta	4
2.3.2 Horno turbo	5
2.3.3 Horno rotativo a convección	5
2.4 CONTROL DE TEMPERATURA EN HORNOS	6
2.5 CONTROLADOR ACTUAL DIGIMEC	7
2.6 TÉCNICAS DE CONTROL DE TEMPERATURA APLICADAS EN HORNOS	7
CAPÍTULO 3.....	9
DESARROLLO	9
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL HORNO	9
3.2 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL	10
3.3 DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL	13
3.3.1 Temperatura del caldero.....	13

3.2.2	Influencia del ventilador	15
3.2.3	Respuesta ante perturbaciones	15
3.3	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR.....	16
3.3.1	Medición	17
	Temperatura del caldero y temperatura del horno	17
	Posición puerta.....	18
3.3.2	Controlador	19
3.3.2	HMI.....	21
3.3.3	Actuadores	22
3.3.4	Fuente de alimentación	25
3.5.1	Programación del controlador.....	28
3.5.2	Panel frontal	30
3.5.3	Configuración de la HMI	31
	CAPÍTULO 4.....	34
	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	34
4.1	PRUEBA SIN PERTURBACIÓN.....	34
4.2	PRUEBA CON PERTURBACIÓN POR APERTURA DE PUERTA	37
	CAPÍTULO 5.....	40
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	40
5.1	CONCLUSIONES	40
5.2	RECOMENDACIONES	41
	REFERENCIAS.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Diagrama de flujo del proceso de horneado de pan	3
Figura 2. 2 Estructura general de un horno	4
Figura 2. 3 Estructura de un horno de gaveta.....	4
Figura 2. 4 Estructura de un horno turbo	5
Figura 2. 5 Estructura de un horno a convección.....	6
Figura 2. 6 Controlador de temperatura Digimec	7
Figura 3. 3 Curva de temperatura para analizar la estabilidad del horno con el sistema actual (a) Set Point 160°C.....	12
Figura 3. 4 Curva de temperatura del horno con existencia de perturbaciones	13
Figura 3. 5 (a) Curva de temperatura del horno y del caldero. Set point 160°C.....	14
Figura 3. 6 (b) Curva de temperatura del horno y del caldero. Set point 180°C	14
Figura 3. 7 Curvas de temperatura al variar la velocidad del ventilador	15
Figura 3. 8 Curvas de temperatura con perturbación de apertura de puerta	16
Figura 3. 9 Diagrama de bloques del controlador	17
Figura 3. 10 Sensor de temperatura AM2 PT100	18
Figura 3. 11 Sensor de proximidad inductivo LJ12A3-4-Z/BX	19
Figura 3. 12 Autómata programable SIEMENS LOGO 8 12-24 RCE.....	20
Figura 3. 13 Módulo análogo AM2 RTD SIEMENS	21
Figura 3. 14 Pantalla LOGO TDE	22
Figura 3. 15 Convertidor de frecuencia WEG CFW300.....	23
Figura 3. 16 Motor trifásico WEG W22	24
Figura 3. 17 Fuente de 24VDC MJJCLED	26
Figura 3. 18 Diagrama PI&D	27
Figura 3. 19 Diagrama de control del sistema en lazo cerrado	28
Figura 4.1 Curva temperatura set point 160°C. Controlador en lazo cerrado.....	34
Figura 4. 2 Curva temperatura set point 160°C. Controlador Digimec	35
Figura 4. 3 Curva temperatura set point 180°C. Controlador en lazo cerrado.....	36
Figura 4. 4 Curva temperatura set point 160°C. Controlador Digimec	36

Figura 4. 5 Curva temperatura set point 160°C. Controlador en lazo cerrado.....	37
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Características del sensor de temperatura RTD	18
Tabla 3. 2 Características del sensor de proximidad inductivo LJ12A3-4-Z/BX	19
Tabla 3. 3 Características del PLC SIEMENS LOGO 8 12-24 RCE.....	20
Tabla 3. 4 Características pantalla LOGO TDE.....	22
Tabla 3. 5 Características del convertidor WEG CFW300	23
Tabla 3. 6 Características del Motor trifásico WEG W22	24
Tabla 3. 7 Quemador BTL10 de la marca BALTUR.....	25
Tabla 3. 8 Características del Quemador BALTUR BTL10.....	25
Tabla 3. 9 Tabla de consumo de corriente del sistema.	26
Tabla 3. 10 Características de la fuente de alimentación de 24VDC MJJCLED.....	26
Tabla 3. 11 Esquema de conexión del controlador	27
Tabla 4. 1 Asignación de entradas y salidas en el PLC LOGO	29
Tabla 4. 2 Descripción de los elementos del panel de mando	30
Tabla 4. 3 Asignación de las teclas de función de la pantalla HMI.....	31
Tabla 4. 4 Pantalla principal del controlador	32
Tabla 4. 5 Descripción elementos pantalla principal	32
Tabla 4. 6 Pantalla secundaria del controlador.	33
Tabla 5. 1 Tabla comparativa entre los dos controladores.....	35
Tabla 5. 2 Tabla comparativa entre los dos controladores.....	36
Tabla 5. 3 Tabla comparativa del tiempo de recuperación	39

RESUMEN

El presente proyecto describe el desarrollo e implementación de un controlador de temperatura en lazo cerrado para los hornos rotativos a convección de la empresa FRIGOMACZ CIA. LTDA, ubicada en el sector de Conocoto en la ciudad de Quito-Ecuador, con el fin de eliminar el error de posición de la temperatura sobre el set point y reducir el tiempo que tarda el horno en recuperar calor ante la perturbación causada por la apertura de puerta. Este proyecto cuenta con dos termocuplas ubicadas en el horno y otra en el caldero respectivamente, un convertidor de frecuencia para variar la velocidad de giro del ventilador, y un sensor que detecta la apertura de puerta. Se utilizó dispositivos industriales disponibles en el mercado local, como: un Controlador Lógico Programable (PLC) LOGO marca SIEMENS, sensores de temperatura PT100, sensores inductivos, actuadores, y una pantalla logo TDE desde la cual se ingresa los valores de set point y se visualiza las variables del proceso de cocción. El montaje del tablero de control y de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) se lo realizó sin alterar la estructura original del horno, se realizaron pruebas a distintos valores de temperatura para validar el funcionamiento del equipo y se obtuvo mejoras considerables respecto al antiguo controlador.

ABSTRACT

This project describes the development and implementation of a closed loop temperature controller for rotary convection ovens of the company FRIGOMACZ CIA. LTDA, located in the Conocoto sector in the city of Quito-Ecuador, in order to eliminate the temperature position error on the set point and reduce the time it takes for the furnace to recover heat before the disturbance caused by the opening Door This project has two thermocouples located in the oven and another in the cauldron respectively, a frequency converter to vary the speed of rotation of the fan, and a sensor that detects the door opening. Industrial devices available in the local market were used, such as: a SIEMENS LOGO Programmable Logic Controller (PLC), PT100 temperature sensors, inductive sensors, actuators, and a TDE logo screen from which the set point values are entered and set. visualize the cooking process variables. The control panel and the Man-Machine Interface (HMI) were assembled without altering the original structure of the furnace, tests were carried out at different temperature values to validate the operation of the equipment and considerable improvements were obtained with respect to the old controller.

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se implementa un controlador de temperatura en lazo cerrado para los hornos rotativos a convección de la empresa FRIGOMACZ CIA. LTDA. Ubicada en Quito calle Ponce Enríquez y Huayna Capac, sector Conocoto, el motivo de desarrollar este controlador es lograr un control más preciso de la temperatura al interior del horno, y así incrementar la calidad de los productos que se hornean. El proyecto técnico consta de 5 capítulos donde se detalla de manera ordenada los pasos realizados para cumplir con el objetivo.

En el capítulo 1 se trata los antecedentes que motivaron el trabajo de titulación, la justificación para el desarrollo del controlador, los objetivos generales, objetivos específicos y la metodología utilizada para la implementación de este proyecto.

El capítulo 2 desarrolla los conceptos básicos necesarios para entender el funcionamiento de un horno en general y se realiza una caracterización de la estructura y los elementos que actualmente dispone.

En el capítulo 3 se realiza un análisis del controlador Digimec, y con la ayuda de otro controlador de la misma marca se realizaron pruebas para determinar una relación entre la temperatura del horno y la del caldero, con las pruebas realizadas se determinó la estrategia de control y los elementos a utilizar, luego se describe el diseño e implementación del controlador a nivel de software, el circuito de control y las conexiones entre los distintos periféricos del PLC.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos mediante gráficas de temperatura vs tiempo, y se analiza si el sistema logró mejoras ante el error de posición y frente a perturbaciones por apertura de puerta.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las empresas ecuatorianas dedicadas a la fabricación de hornos industriales para panificación no cuentan con controladores de temperatura eficientes para su proceso, el método para controlar y ajustar la temperatura es impreciso, por lo que genera pérdidas energéticas y alteraciones en el producto final.

Este es el caso de la empresa FRIGOMACZ CIA. LTDA ubicada en la Av. Camilo Ponce Enríquez y F1 sector Conocoto, la cual utiliza en sus hornos controladores de tipo ON-OFF importados desde Brasil que únicamente miden y controlan la temperatura dentro de la cámara de horneo, por lo que, la temperatura real del horno excede hasta en 10 grados centígrados a la temperatura programada y este exceso de calor conlleva a que los productos terminados no tengan una cocción adecuada. Además, estos controladores son muy sensibles a las fluctuaciones de voltaje, tienen un costo elevado y no cuentan con respaldo técnico local.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Se presenta la necesidad de recurrir a la implementación de un controlador de temperatura en lazo cerrado mediante el uso de un Controlador Lógico Programable (PLC) en su proceso y una Interfaz Hombre Máquina (HMI) para su visualización, que cumpla con la expectativa de eliminar el exceso de temperatura en la cámara de horneo, evitando alteraciones en el producto final y aumentando la eficiencia del horno en consumo de combustible.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un controlador de temperatura en lazo cerrado para que la empresa FRIGOMACZ CIA LTDA implemente en sus hornos rotativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el proceso de cocción con los hornos rotativos de la empresa FRIGOMACZ CIA LTDA. para la determinación de las variables y parámetros que intervienen en el mismo.
- Diseñar un controlador de temperatura en lazo cerrado para el control moderno de las variables del proceso.
- Diseñar una interfaz HMI para la visualización y parametrización del proceso.
- Implementar el controlador de temperatura en un horno de la empresa FRIGOMACZ CIA. LTDA. para la constatación de su funcionamiento.
- Realizar las pruebas de operación para la validación del equipo.

1.4 METODOLOGÍA

- Caracterización del funcionamiento y modo de calentamiento del horno para identificar sus variables mediante el método de observación.
- Para determinar la estrategia de control se instalará una termocupla adicional en el caldero y se realizará mediciones de temperatura tanto en la cámara de horneado como en el caldero mediante el método práctico.
- En el desarrollo del controlador en lazo cerrado se usará un PLC que será programado con la ayuda de su software correspondiente, controlará las señales analógicas provenientes de los dos sensores de temperatura y los actuadores propios del horno mediante el método práctico.
- La calibración de los sensores de temperatura y la parametrización del flujo de aire se realizará aplicando el método deductivo.
- Se instalará un tablero eléctrico con las protecciones, señalización y los mandos necesarios para el proceso en un lugar de fácil acceso para el usuario con el fin de facilitar la revisión del tablero mediante el método práctico.
- En las pruebas de funcionamiento se empleará el método comparativo entre el controlador procedente de Brasil y el controlador en lazo cerrado desarrollado en este proyecto técnico.

CAPÍTULO 2

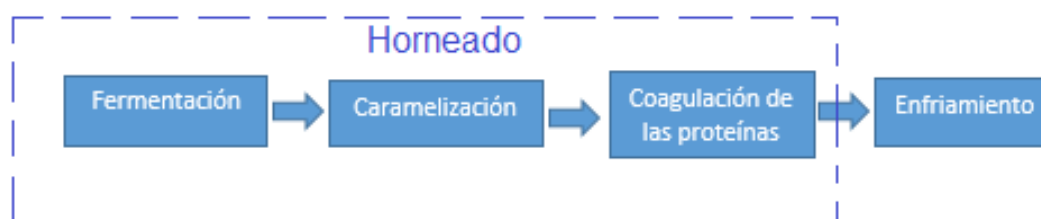
MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detallan los conceptos teóricos más relevantes necesarios para el desarrollo del proyecto técnico, con el propósito de conocer los procesos industriales a ser implementados.

2.1 HORNEADO DE PAN

El horneo consiste en aplicar calor a una masa de harina y agua, fermentada para que se transforme, expanda y convierta en un pan digerible, esponjoso y crujiente. Este proceso se realiza utilizando un horno. El proceso de horneo inicia con la etapa de fermentación, la cual ocurre en los primeros 10 minutos en donde la masa crece y se expande rápidamente gracias al efecto de la levadura; luego se da el proceso de caramelización, en donde los azúcares se combinan con los aminoácidos produciendo el color de la corteza; seguido a esto se da la coagulación, donde el agua que no ha sido atrapada por los almidones se evapora y las proteínas de la masa se tuestan adquiriendo una corteza consistente. Una vez horneado, el pan debe dejarse enfriar y reposar antes de servirse. (Flecha, Manuel, 2015)

Figura 2. 1 Diagrama de flujo del proceso de horneo de pan



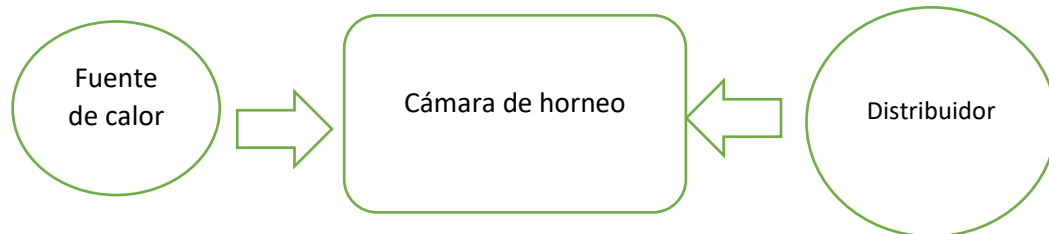
Fuente: (Flecha, Manuel, 2015)

2.2 HORNO

Es un dispositivo que genera calor y lo mantiene dentro de un compartimiento cerrado para cocinar, calentar o secar alimentos. Su estructura básica consta de una fuente de calor, una cámara y mecanismo distribuidor del calor en la cámara como se indica en la figura 2.2.

La fuente de calor es la encargada de obtener la energía calorífica a través de la combustión de combustibles fósiles o por medio del efecto Joule en resistencias eléctricas.

Figura 2. 2 Estructura general de un horno



Elaborado por: Zurita Alex

2.3 CLASIFICACIÓN DE HORNOS PARA HORNEADO DE PAN

2.3.1 Horno de gaveta

También son conocidos como hornos convencionales, su estructura es similar a un armario, con divisiones y repisas que pueden llegar hasta los 4 niveles, tiene aislamiento de fibra de vidrio en los costados y puertas. La energía calorífica se obtiene mediante la combustión de gas licuado de petróleo para generar una llama en la parte inferior en estructuras metálicas similares a flautas, el calor asciende hasta los compartimentos superiores por pequeñas separaciones que existen en los costados y entre los compartimentos del horno. En este tipo de hornos el operador debe mover y cambiar las bandejas para obtener un horneado parejo, ya que las bandejas de la parte inferior reciben más calor que las bandejas de la parte superior y desprende mucho calor hacia el exterior. (Omega, 2019)

Figura 2. 3 Estructura de un horno de gaveta



Fuente: (Hornos Weston, Bogotá- Colombia)

2.3.2 Horno turbo

Son hornos similares a los de gaveta, con la diferencia de que la cámara no tiene compartimientos, en su lugar cuentan con una cámara que permite colocar las bandejas una sobre otra a una determinada distancia, la combustión se realiza en la parte inferior del horno a través de combustión de gas en flautas metálicas o por calentamiento de resistencias eléctricas, el calificativo “turbo” se debe a que dispone de un ventilador o turbina que se encarga de distribuir el calor que sube por los costados del horno mediante el flujo de aire constante en el interior de la cámara de horneo. Con esta estructura la cocción del pan es pareja y no es necesario intercambiar las bandejas, la desventaja de estos hornos es que no se puede hornear pastelería fina o galletería, debido a que el flujo de aire del ventilador golpea directamente a los productos y tiende a estropearlos. (Omega, 2019)

Figura 2. 4 Estructura de un horno turbo



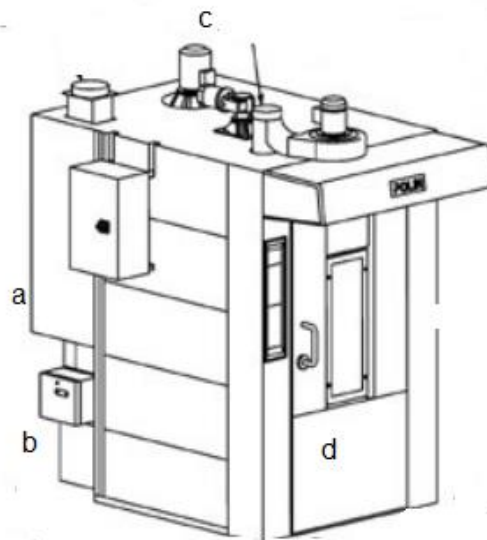
Estructura de un horno turbo. a) Flautas de gas, b) cámara de horneo, c) ventilador Fuente: (Hornos Venancio. Italia)

2.3.3 Horno rotativo a convección

La fuente de calor es un caldero en cuyo interior se realiza la combustión de diésel, dispone de un ventilador ubicado en la parte superior para absorber el calor irradiado por el caldero y enviarlo a la cámara de horneo a través de un túnel, de manera que el aire caliente recircula por toda la cámara con flujo de aire constante. La cámara de horneo tiene un sistema mecánico que gira a baja velocidad en el que se acopla un

coche portabandejas, en este tipo de horno el flujo de aire que produce el ventilador no golpea directamente al pan, el calor sale por unas pequeñas rejillas y la rotación del coche portabandejas garantiza un horneado parejo.

Figura 2. 5 Estructura de un horno a convección



Estructura de un horno a convección, a) caldero, b) quemador, c) ventilador, d) cámara de horneado. Fuente: (Ficha técnica hornos rotativos FRIGOMAQ, 2015)

2.4 CONTROL DE TEMPERATURA EN HORNOS

Independientemente del tipo de horno, el horneado de pan requiere de un control de temperatura en el interior de la cámara que la mantenga constante, ya que, si se hornea a una temperatura excesivamente alta, no se transmitirá bien el calor al interior del pan y se tostará demasiado la corteza; al contrario, si se hornea el pan a una temperatura muy baja o durante poco tiempo el pan saldrá pequeño, húmedo y será indigesto. En panes cuya masa sea muy hidratada o fermentada se recomiendan temperaturas más altas de horneado, mientras que en masas poco hidratadas o en panes más grandes en los que se quiera conseguir una miga más compacta se recomiendan temperaturas de cocción más bajas, pero siempre constantes durante todo el proceso. (Flecha, Manuel, 2015)

Convencionalmente el control de temperatura en hornos industriales se realiza con un controlador de tipo ON-OFF que prende o apaga el quemador de acuerdo con el set point establecido por el usuario y la lectura de temperatura de una termocupla instalada en el interior de la cámara de horneó. Este control tiende a hacer que la temperatura de la cámara de horneó se exceda, debido a que el caldero es una bóveda hermética que almacena e irradia calor aun estando apagado.

2.5 CONTROLADOR ACTUAL DIGIMEC

En el horno rotativo a convección de la empresa se dispone de un controlador tipo ON-OFF de procedencia brasilera que cuenta con una entrada digital y 5 salidas digitales tipo relé, posee un display de dos filas y 16 caracteres para la visualización de parámetros, sus salidas permiten controlar el encendido y apagado del quemador, ventilador, lámpara y vapor del horno en función del tiempo de cocción. Funciona a 220v 60Hz y admite en su entrada una termocupla tipo J.

Figura 2. 6 Controlador de temperatura Digimec



Fuente:(www.digimec.br)

2.6 TÉCNICAS DE CONTROL DE TEMPERATURA APLICADAS EN HORNOS

Considerando el exceso de temperatura que se obtiene en el control ON-OFF, se han desarrollado y evaluado distintas técnicas de control en aplicaciones de calentamiento en hornos; (Flores, 2016) realizó un controlador de temperatura PID en un horno

eléctrico para secado de bobinas de motores, se implementó en un PLC SIEMENS y la realimentación es una termocupla, con este controlador se obtuvo un tiempo de establecimiento de 255 minutos para un set point de 100°C, y 460 minutos para un set point de 130°C, lo cual no justifica la implementación de un PID, ya que este tipo de control se utiliza para procesos que requieren una respuesta inmediata sobre la variable de control. (Escamilla, 2012), desarrolló el control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa aplicado al horno de cerámica de la Universidad Tecnológica de Mixteca para sustituir su control manual, el software del sistema y el controlador se desarrollaron en LabVIEW, la adquisición y envío de datos se realizaron con una tarjeta de adquisición de datos. El controlador difuso mejoró la calidad y acabado de las piezas y el tiempo de cocción de la cerámica. (Escamilla, 2012). En el artículo publicado por (Castaño, 2013), se presentó el control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controles PI, al ser un horno lineal y extenso se requiere una temperatura estable a lo largo de la banda que transporta las prendas, se diseñó una tarjeta electrónica con un PIC y amplificadores operacionales para la adquisición de las señales de temperatura, se logró un buen tiempo de establecimiento, una estabilidad alta y un bajo sobre impulso en la planta. (Castaño, 2013)

En el 2001 (Valverde, 2001), presentó el diseño e implementación de un controlador difuso para la regulación de temperatura de un horno eléctrico, con el fin de mantener una temperatura constante, controlando la cantidad de electricidad aplicada a un banco de resistencias, el controlador se implementó sobre una arquitectura de hardware basado en microcontrolador M68HC11E9, se logró en el sistema una gran velocidad de respuesta y se afirmó que es un control en tiempo real según el tipo de energía usada (Valverde, 2001)

De los trabajos revisados, se pudo apreciar que en todos ellos el control se ejercía variando el voltaje sobre la fuente de calor (resistencias), en el caso de los hornos rotativos, la fuente de calor es un quemador de diésel, al que no se puede modificar su potencia, por lo que las técnicas de control revisadas, ya sea control difuso o PID no son factibles para el proyecto.

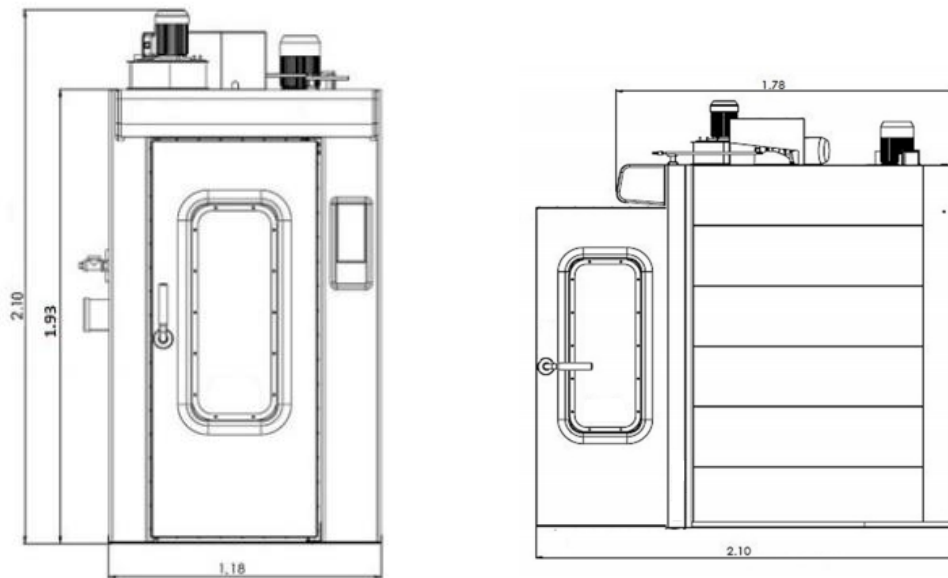
CAPÍTULO 3

DESARROLLO

3.1 CARACTERISTICAS DEL HORNO

El interior y exterior del horno está fabricado en acero inoxidable AISI 430 y AISI 304 de 1mm de espesor, la estructura está unida mediante soldadura, a excepción del vaporizador y la puerta, que se encuentra sujeta por pernos

Figura 3. 1 Estructura de un horno rotativo FRIGOMAQ



Fuente: Ficha técnica hornos Frigomaq

Tabla 3. 1 Dimensiones del horno rotativo a convección

Ancho (m)	Alto (m)	Longitud (m)	Peso (kg)
1,18	2,10	1,78	900

Fuente: Ficha técnica hornos Frigomaq

Tabla 3. 2 Características técnicas de un horno rotativo Frigomaq

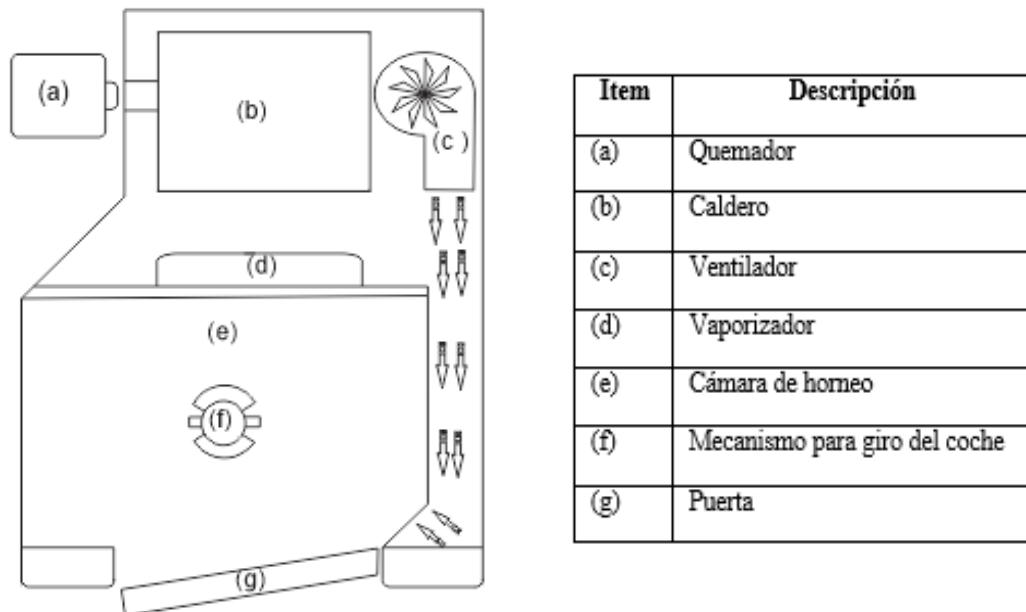
Parámetro	Valor
Tensión eléctrica	220 [Vac]
Frecuencia	60 [Hz]
Fases	Trifásico
Potencia instalada	1,95 [kW]
Consumo de combustible	1,0 gal/h
Temperatura máxima de operación	200 [°C]
Área de cocción	3,80 [m ²]
Capacidad de bandejas	18 (0,45x0,65m)
Capacidad de producción	360 panes/horneada

Fuente: Ficha técnica hornos Frigomaq

3.2 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL

En la empresa Frigomacz. Cía. Ltda., se dispone de un horno rotativo para la cocción de pan. El horno dispone de un quemador italiano de marca BALTUR a diésel, con su propio controlador de llama para mantener una presión de combustión constante; la llama se genera dentro de un caldero hermético con una chimenea para que los gases de combustión sean evacuados hacia el exterior y no ingresen a la cámara de horneo. Sobre el caldero se encuentra un ventilador metálico acoplado a un motor que gira a velocidad nominal para absorber el calor irradiado por el caldero y enviarlo por un túnel hacia la cámara de horneo que lo distribuye por unas pequeñas rejillas. Dentro de la cámara de horneo existe un mecanismo donde el coche portabandejas se acopla y se eleva al cerrar la puerta, el coche gira durante todo el proceso de cocción por acción de un motor reductor.

Figura 3. 2 Esquema de un horno rotativo

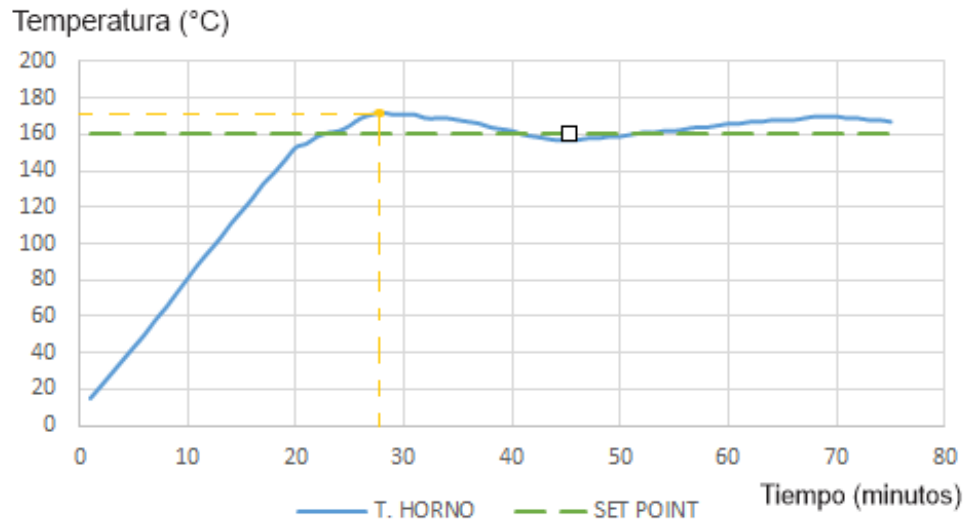


Elaborado por: Zurita Alex

El horno tiene un control de temperatura ON-OFF de marca DIGIMEC, el cual, al encender la salida de ventilador, enciende también el quemador, siempre y cuando la temperatura del horno sea menor a la programada, al alcanzar la temperatura programada, el quemador se apaga y luego encenderá de acuerdo a la histéresis del controlador, el ventilador permanece encendido durante todo el proceso.

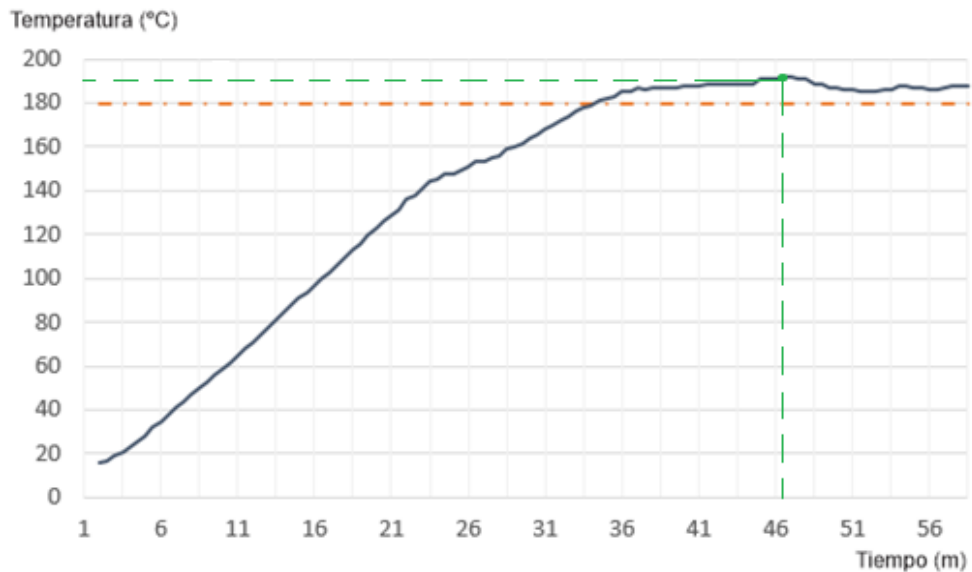
Para evaluar la dinámica del sistema actual se adquirieron datos de temperatura en el interior del horno para un set point de 160°C y 180°C desde el encendido del horno hasta que se estabilice la temperatura de la cámara. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.3 donde se puede apreciar que existe un sobre impulso de 6.7 % y un error de posición de 12°C para ambos casos, también se tiene un tiempo de subida de 24 min y 33 min respectivamente, este comportamiento es perjudicial ya que puede llegar a quemar los panes que se están horneando.

Figura 3. 1 Curva de temperatura para analizar la estabilidad del horno con el sistema actual (a) Set Point 160°C



Elaborado por: Zurita Alex

(b) Set point de 180°C

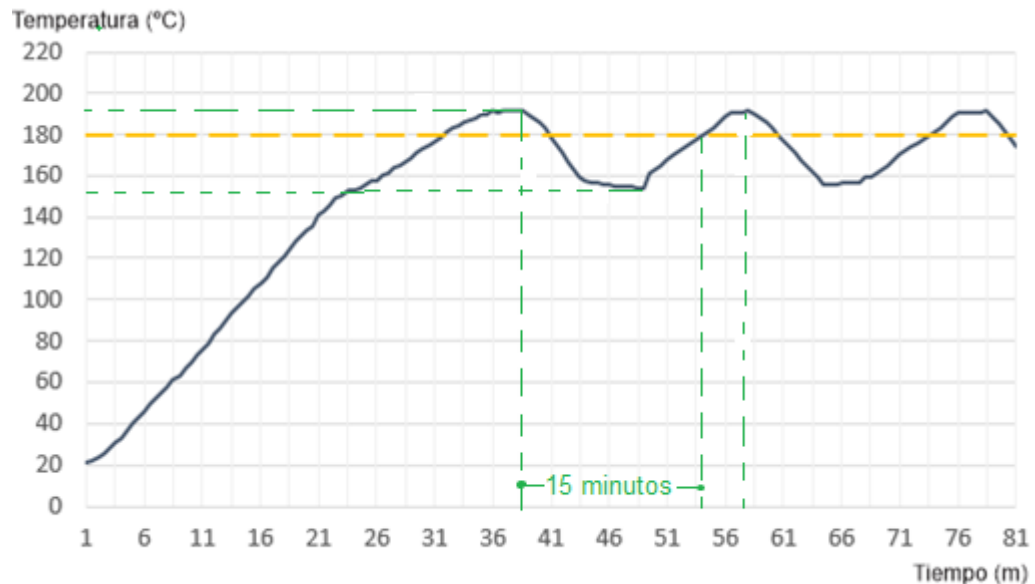


Elaborado por: Zurita Alex

Una vez calentado el horno, se abre la puerta para ingresar el coche portabandejas, debido a que el ventilador sigue encendido existe una fuga de calor hacia el exterior, representando una fuente de perturbación, esta condición se evaluó para caracterizar la respuesta ante perturbaciones mediante la adquisición de datos durante 81 minutos, con apertura de puerta a los 38 y 58 minutos. En la figura 3.4 se observa que el horno

pierde alrededor de 34°C y demora aproximadamente 15 minutos en alcanzar nuevamente el valor programado desde la apertura de la puerta, además se puede notar que el sobre impulso es constante en cada subida de la temperatura.

Figura 3. 2 Curva de temperatura del horno con existencia de perturbaciones



Elaborado por: Zurita Alex

3.3 DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

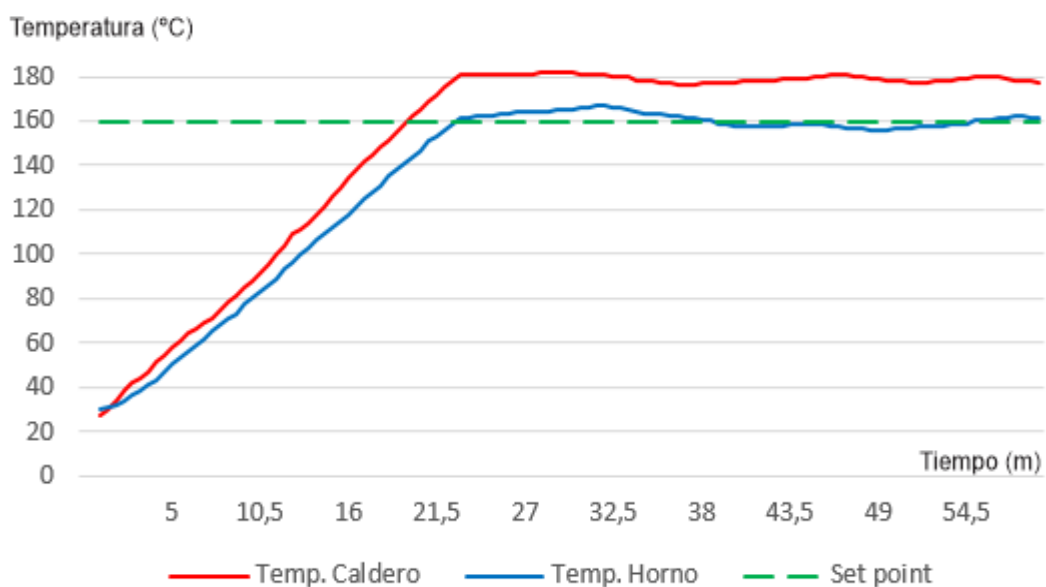
De acuerdo con el análisis realizado en la sección 3.1, se determinó que existe la necesidad de mejorar el controlador para disminuir el error de posición y mejorar la respuesta transitoria, además se identificó que el calor almacenado en el caldero y la distribución de calor por el ventilador constituyen las variables de control del sistema. El sistema de control de llama del quemador es cerrado y no es regulable por lo que no se le considera variable de control.

3.3.1 Temperatura del caldero

El calor generado y almacenado por el caldero influye directamente en la temperatura de la cámara de horneado, por lo que es necesario hallar su relación de manera que se pueda establecer una regla de control, con este propósito se adquirió la temperatura de la cámara y el caldero al mismo tiempo mientras el sistema funciona con el control actual, para generalizar el resultado se realizaron mediciones en 3 días distintos y en diferentes valores de Set Point. Se identificó que, al estabilizarse la temperatura en la

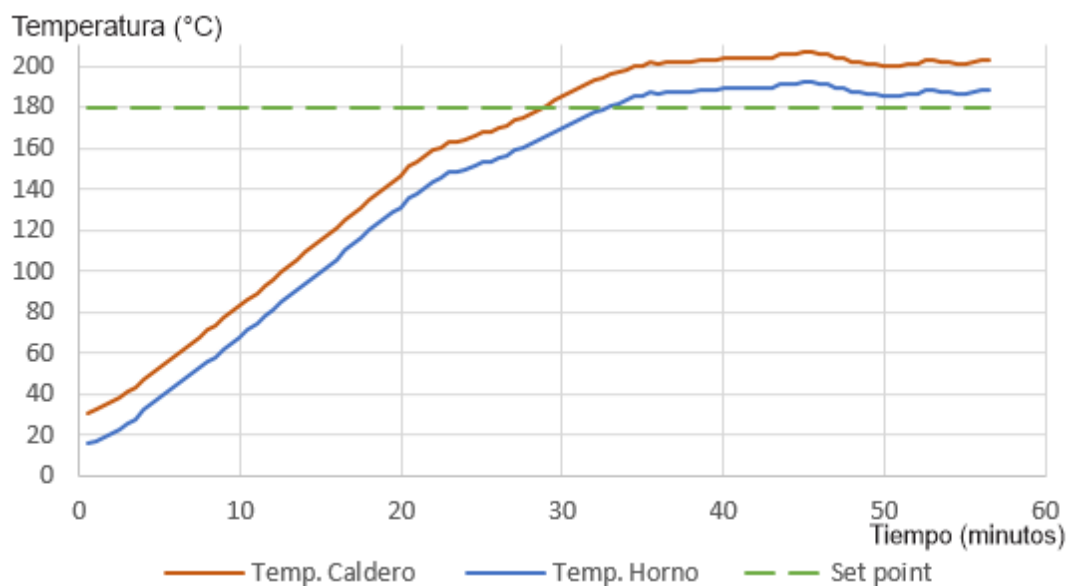
cámara, la temperatura del caldero se mantiene 20 grados por encima de la temperatura de la cámara sin importar el set point.

Figura 3. 3 (a) Curva de temperatura del horno y del caldero. Set point 160°C



Elaborado por: Zurita Alex

Figura 3. 4 (b) Curva de temperatura del horno y del caldero. Set point 180°C

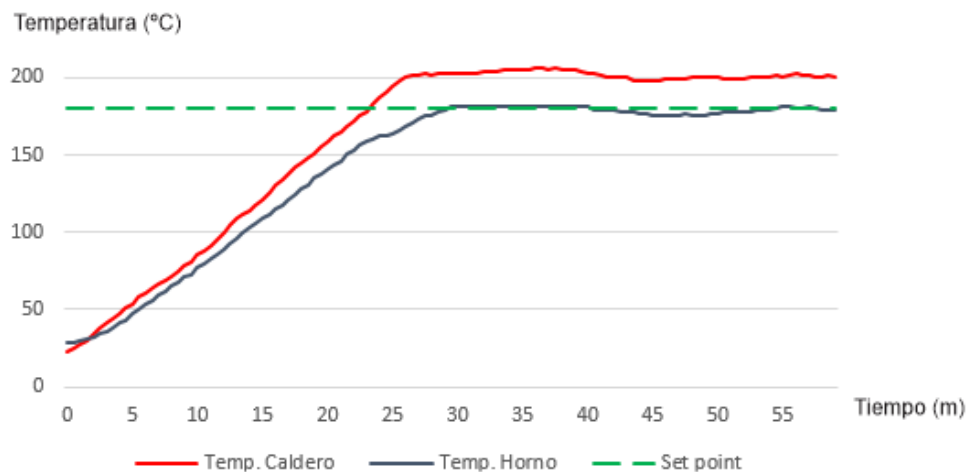


Elaborado por: Zurita Alex

3.2.2 Influencia del ventilador

El ventilador opera todo el tiempo, para mantener el flujo de aire constante en el interior de la cámara de horneado, esto provoca que el calor irradiado siga yendo a la cámara, aunque ya se tenga la temperatura deseada. Se evaluó el efecto de reducir la velocidad al alcanzar el set point, se obtuvo que con 75% de velocidad nominal la temperatura de la cámara se estabiliza en el set point y se reduce el sobre impulso a 5°C además de obtener una buena distribución del calor en la cámara, velocidades menores provocan un mayor tiempo de establecimiento, reduce la respuesta dinámica y provoca una mala circulación del aire caliente en la cámara.

Figura 3. 5 Curvas de temperatura al variar la velocidad del ventilador

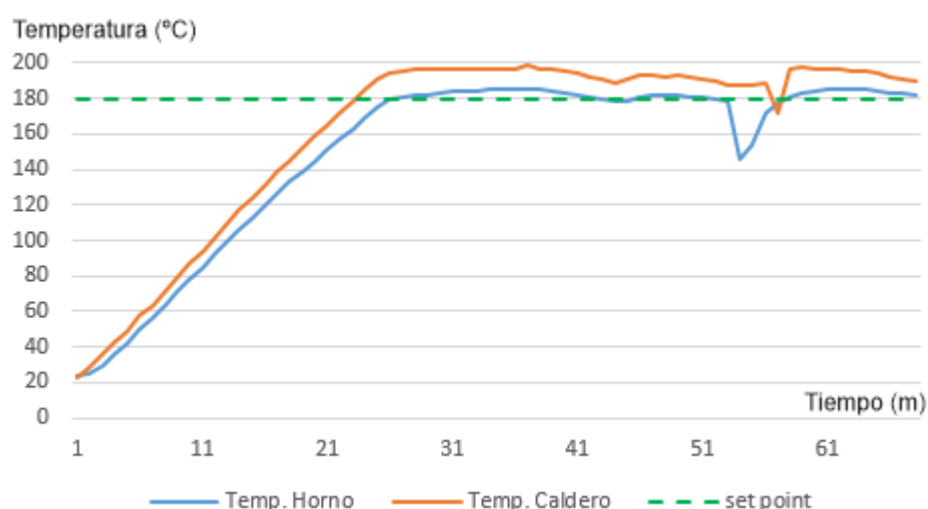


Elaborado por: Zurita Alex

3.2.3 Respuesta ante perturbaciones

Al momento de abrir la puerta, el horno pierde mucha temperatura debido al intercambio de calor con el exterior, por lo cual se experimentó el efecto de introducir mayor aire caliente en la cámara mientras la puerta está abierta mediante la acción del ventilador.

Figura 3. 6 Curvas de temperatura con perturbación de apertura de puerta



Elaborado por: Zurita Alex

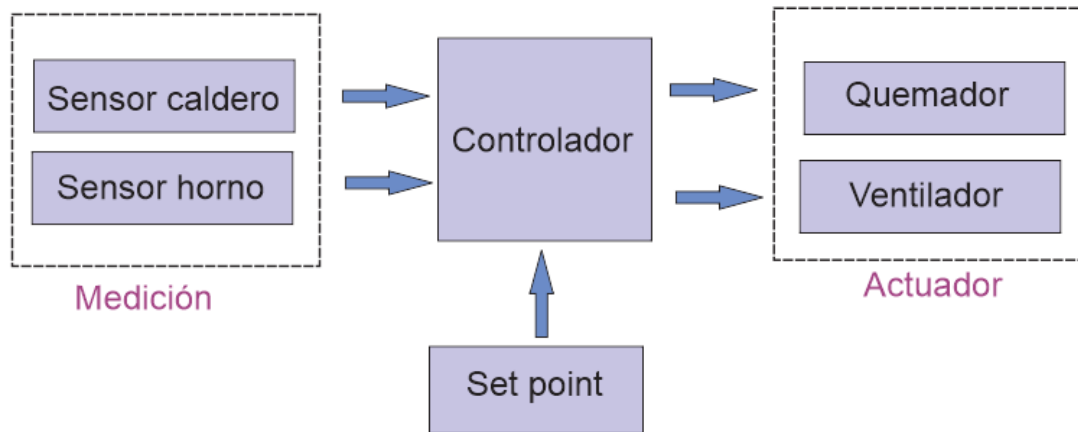
Al realizar esta acción, el horno recuperó la temperatura en 9 min, con lo cual se pudo reducir en 3 min el tiempo de recuperación. Esta prueba también permitió identificar que el controlador de temperatura del caldero no debe responder en función de la temperatura de la cámara ya que esto provoca un exceso de calor almacenado, incrementando el sobre impulso y el error.

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

En base a los resultados obtenidos en 3.2 se plantea la siguiente estrategia de control: El sistema funcionará en función de dos sensores de temperatura, uno ubicado en el caldero y otro en la cámara. La temperatura del caldero se mantendrá constante a 10 grados sobre el set point de la temperatura del horno mediante la activación y desactivación del controlador de llama, el ventilador funcionará al 100% de su velocidad mientras el horno se calienta hasta que la temperatura de la cámara llegue al set point, donde inmediatamente se reduce al 75%. Mediante un sensor de presencia se detectará la apertura de la puerta para que el ventilador funcione a un 100% de su velocidad y se encenderá el quemador para incrementar la temperatura del caldero y elevar la temperatura de la cámara con mejor respuesta dinámica.

Este control se implementa de acuerdo al siguiente esquema de bloques.

Figura 3. 7 Diagrama de bloques del controlador



Elaborado por: Zurita Alex

El bloque medición es el encargado de adquirir las medidas de temperatura de caldero, temperatura de la cámara y posición de la puerta. El bloque actuador se encarga de activar o desactivar el quemador para controlar la temperatura del caldero, así como permite variar la velocidad del ventilador. El controlador se encarga de realizar las acciones de control en función de la comparación entre las medidas de temperatura del caldero y cámara con el set point, así como la posición de la puerta de la cámara.

3.3.1 Medición

Temperatura del caldero y temperatura del horno

Los sensores de temperatura utilizados en el caldero y en el horno son de tipo RTD (detector de temperatura por resistencia), fabricados de platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0°C, debido la distancia entre el tablero de control y la ubicación de los sensores se utiliza sensores PT100 de 3 hilos, de los cuales dos cables son de señal y el restante es de referencia a tierra, con el sensor de 3 hilos se corrige el error de medida generado por el largo de los cables. Al ser utilizados a temperaturas altas el sensor posee un revestimiento de malla metálica.

Figura 3. 8 Sensor de temperatura AM2 PT100



Fuente (OMEGA, 2019)

Tabla 3. 3 Características del sensor de temperatura RTD

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo	PT100	
Rango de medida	-50 – 450	°C
Longitud del cable	2	[m]
Longitud del sensor	10	[mm]
Diámetro de la sonda	M8	[mm]
Corriente	4-20	[mA]
Voltaje	0-10	[Vdc]

Fuente (OMEGA, 2019)

Posición puerta

Para detectar la apertura de puerta se utiliza un sensor de proximidad inductivo LJ12A3-4-Z/BX que permite detectar objetos metálicos a una distancia de 10 mm, en la parte superior del horno se instaló un perno para regular el alcance del sensor y poderlo calibrar, al ser un dispositivo sellado es poco susceptible al agua o polvo y puede trabajar a temperaturas de hasta 90°C.

Figura 3. 9 Sensor de proximidad inductivo LJ12A3-4-Z/BX



Fuente (Naylampmechatronics, 2019)

Tabla 3. 4 Características del sensor de proximidad inductivo LJ12A3-4-Z/BX

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Voltaje de alimentación	5	24	28	[Vdc]
Alcance	1		8	[mm]
Consumo de energía	-	20	-	[mA]
Tiempo de respuesta	-	1	-	[ms]
Salida		NPN		-

Fuente (Naylampmechatronics, 2019)

3.3.2 Controlador

Se utiliza el controlador lógico programable de la serie LOGO 8/12-24 RCE perteneciente a la marca SIEMENS, este controlador cuenta con 4 salidas tipo relé, adicionalmente tiene 6 entradas digitales y dos analógicas, el voltaje de alimentación es de 24VDC, permite conectar hasta 8 módulos de expansión para entradas y salidas, además cuenta con un puerto RJ45 para comunicación Ethernet, la programación es en lenguaje FUP (diagrama de funciones). Se eligió este controlador porque permite la integración de varios módulos de expansión, el software de programación es libre y además ofrece alta fiabilidad para trabajar en ambientes industriales hostiles.

Figura 3. 10 Autómata programable SIEMENS LOGO 8 12-24 RCE



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 3.5 Características del PLC SIEMENS LOGO 8 12-24 RCE

Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
Voltaje de alimentación	10,8	24	28,8	[Vdc]
Entradas	-	8	-	
Salidas	-	4	-	
Consumo de energía	15	-	90	[mA]
Voltaje de entrada sensores	0	-	24	[Vdc]
Corriente en salidas			10	[A]
Puerto de comunicación	-	RJ45	-	

Fuente (SIEMENS, 2019)

Módulo de expansión analógico

El módulo utilizado para la conexión de los sensores de temperatura es el AM2 RTD de la marca SIEMENS, el cuál admite la conexión de dos termocuplas PT100 o PT100, se alimenta con un voltaje de 24VDC y no posee salidas, su conexión es sencilla y las termocuplas se conectan directamente al módulo sin necesidad de utilizar un acondicionador de señal.

Figura 3. 11 Módulo análogo AM2 RTD SIEMENS



Fuente (SIEMENS, 2019)

Tabla 3.6 Características del Módulo análogo AM2 RTD SIEMENS

Parámetro	Valor	Unidad
Entradas analógicas utilizables	2 x PT100	
Voltaje de entrada	12/24	[Vdc]
Corriente	100	[mA]
Dimensiones (H x W x D)	36x90x53	[mm]
Temperatura de trabajo máxima	55	[°C]

Fuente (SIEMENS, 2019)

3.3.2 HMI

Se utiliza una pantalla digital LOGO TDE 6ED1055 de la marca SIEMENS que cuenta con una pantalla de 6 líneas con 20 caracteres por cada una, retroiluminación y contraste controlable, 3 colores de fondo, 6 botones de entrada táctil, en el display se podrá visualizar la temperatura actual del horno, la temperatura programada, el tiempo de cocción y la velocidad de giro del ventilador. En la figura 3.9 se puede observar el modelo de la pantalla.

Figura 3. 12 Pantalla LOGO TDE



Fuente (SIEMENS, 2019)

Tabla 3.7 Características pantalla LOGO TDE

Especificaciones	Detalle	Características
Físicas	Tamaño	128x86 mm
	Resolución	6 líneas * 20 caracteres
	Temperatura funcionamiento	Máximo 55° C
Comunicación.	Comunicación Ethernet	2 puertos RJ45
Eléctricas	Voltaje de entrada	12-24 [Vdc]
	Consumo de corriente	120 [mA]

Fuente: (SIEMENS, 2019)

3.3.3 Actuadores

Variador de frecuencia

Se utilizó un convertidor de frecuencia de la serie CFW300, perteneciente a la marca WEG, el cual tiene una interfaz de operación (HMI) incorporada, se programa sin necesidad de un computador, tiene 4 entradas digitales PNP o NPN, una entrada analógica y una salida a relé, permite conectar módulos de expansión para entradas y salidas, admite comunicación RS485, RS232, Profibus y Ethernet, modos de control

escalar (V/F) o vectorial (VVW), además puede funcionar en modo ahorro de energía. Se eligió este controlador por que puede ser programado sin necesidad de un computador y su costo es bajo en relación a convertidores de otras marcas.

Figura 3. 13 Convertidor de frecuencia WEG CFW300



Fuente: (WEG, 2019)

Tabla 3. 8 Características del convertidor WEG CFW300

Parámetro	Valor	Unidad
Corriente nominal de salida	1,1 a 15,2	[A]
Entradas digitales	4 PNP o NPN	
Salidas a relé	1	
Entrada analógica	0-10	[Vdc]
Voltaje de salida	100-127, 200-240, 380	[V]
Módulos plug-in	RS485, RS232, Ethernet, USB	

Fuente (WEG, 2019)

Motor trifásico de inducción

El motor utilizado para hacer girar al ventilador del horno es de la marca WEG modelo W22 que es diseñado especialmente para trabajar en ambientes húmedos o severos sin afectar su vida útil, posee un exclusivo sistema de aislamiento denominado WISE, que aumenta la resistencia dieléctrica de los bobinados y una brida de sujeción para evitar vibraciones al momento de acoplar la carga. En la tabla 3.4 se puede observar sus principales características.

Figura 3. 14 Motor trifásico WEG W22



Fuente (WEG, 2019)

Tabla 3. 9 Características del Motor trifásico WEG W22

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	220	[A]
Corriente nominal	8.33	[A]
Frecuencia	60	[Hz]
Velocidad	1720	[rpm]
Potencia	2,2	[kW]
Factor de potencia	0,85	
Factor de servicio	1	

Fuente: (WEG, 2019)

Quemador

El quemador utilizado para calentar el horno es el modelo BTL10 de la marca BALTUR, que tiene una capacidad de 0.5 hasta 3 galones de diésel, el voltaje de

alimentación es de 220v y posee su propio controlador de llama, que se encarga de energizar el ventilador de aire, los electrodos de encendido, la electroválvula de la bomba y algo muy importante en este quemador es que posee una fotorresistencia para detectar la presencia de llama en el interior del caldero.

Tabla 3. 2 Quemador BTL10 de la marca BALTUR



Fuente (BALTUR, 2019)

Tabla 3. 10 Características del Quemador BALTUR BTL10

Parámetro	Valor	Unidad
Tipo de combustible	Gasóleo	-
Funcionamiento	Una etapa	-
Potencia térmica mínima	60,2	[kW]
Potencia térmica máxima	118	[kW]
Tensión alimentación	220	[Vac]
Frecuencia alimentación	50/60	[Hz]
Potencia motor ventilador	0.1	[kW]

Fuente (BALTUR, 2019)

3.3.4 Fuente de alimentación

Para garantizar un adecuado funcionamiento de los elementos del sistema, se elaboró la tabla 3.9 y así determinar la corriente mínima de consumo.

Tabla 3. 11 Tabla de consumo de corriente del sistema.

Elemento	Corriente [mA]	Voltaje [Vdc]
Modulo analógico	100	24
Sensor inductivo	20	24
PLC LOGO	90	24
Pantalla HMI	120	24
Total	330	24

Fuente:(Alex Zurita, 2019)

Considerando los elementos utilizados, y en base a la tabla 3,9 el sistema necesita de una fuente de poder que proporcione mínimo 330 miliamperios. Se utiliza una fuente marca MJJCLED de 5 amperios, suficientes para satisfacer nuestra carga. El voltaje de salida es de 24Vdc y puede ser alimentado con 110 o 220V. La fuente cuenta con una protección de sobrecarga y sobre voltaje.

Figura 3. 15 Fuente de 24VDC MJJCLED



Fuente (electan.com, 2019)

Tabla 3. 12 Características de la fuente de alimentación de 24VDC MJJCLED

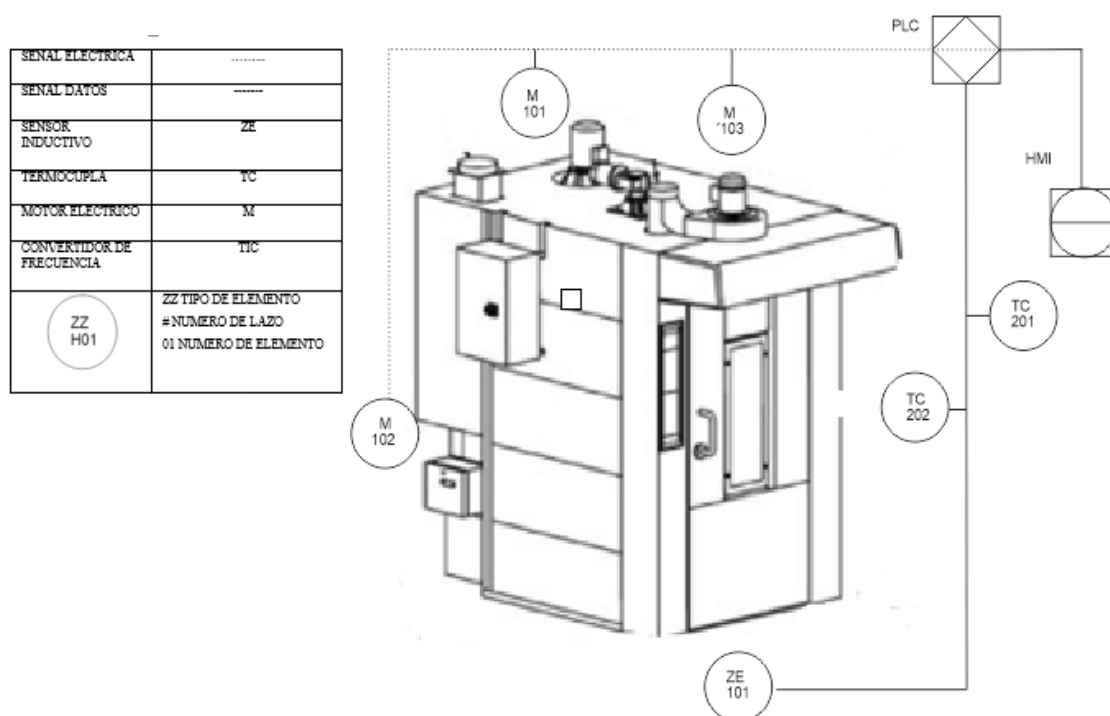
Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje de entrada	110/220	[Vac]
Voltaje de salida	24	[Vdc]
Corriente (carga)	5	[A]
Potencia	50	[W]
Eficiencia	90	[%]

Fuente (electan.com, 2019)

3.4 DIAGRAMA PI&D

El diagrama de instrumentación de la planta se observa en la figura 3.18

Figura 3. 168 Diagrama PI&D



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 3. 13 Descripción de los elementos del horno rotativo

Símbolo	Descripción
M101	Motor ventilador
M102	Quemador
M103	Motor de giro coche
TC201	Termocupla caldero
TC202	Termocupla horno
ZE101	Sensor inductivo de puerta

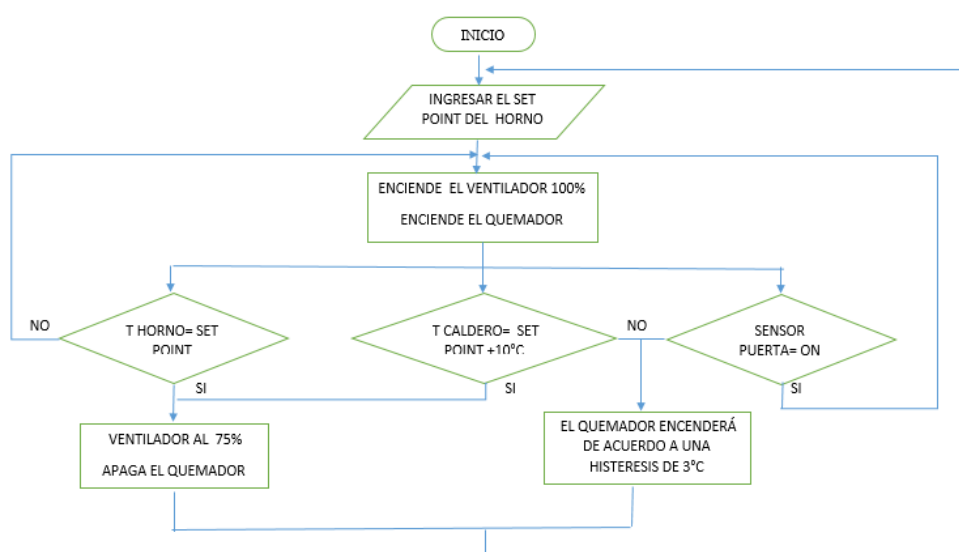
Elaborado por: Zurita Alex

3.5 DESARROLLO DEL SOFTWARE

3.5.1 Programación del controlador

La estrategia de control se desarrolló mediante el software de programación LOGO! Soft Confort tanto para el PLC como para el HMI. La programación se realizó en lenguaje Bloque Lógico de Funciones (FUP), de acuerdo con el siguiente diagrama de flujo. En el Anexo 1 se muestra la programación del PLC en bloque de funciones.

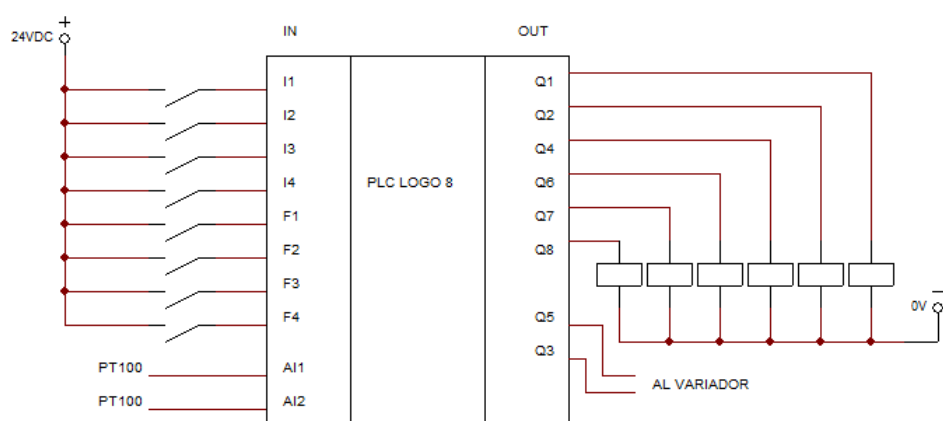
Figura 3. 179 Diagrama de control del sistema en lazo cerrado



Elaborado por: Zurita Alex

Para la programación se asignó a cada sensor una entrada y a cada actuador una salida, en la figura 4.2 se muestra un plano con las entradas y salidas del PLC LOGO, en la tabla 4.1 se detalla los periféricos del PLC.

Figura 3. 20 Plano de entradas y salidas del PLC



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 3. 11 Asignación de entradas y salidas en el PLC LOGO

Nombres de E/S	Identificación
I1	Sensor puerta
I2	Selector rotación
I3	Selector extractor
I4	Sensor rotación.
AI3	Sensor de temperatura caldero
AI4	Sensor de temperatura horno
Q1	Buzzer
Q2	Relé lámpara
Q3	Salida ventilador 100%
Q4	Relé quemador
Q5	Salida ventilador 75%
Q6	Solenoides horno
Q7	Relé rotación
Q8	Relé extractor
F1	Tiempo de cocción
F2	Lámpara
F3	Ventilador
F4	Vapor horno

Fuente:(Alex Zurita, 2019)

3.5.2 Panel frontal

El horno cuenta con un panel frontal, como se indica en la figura 4.2, donde se encuentra el switch de encendido general, switch de rotación, switch extractor y un buzzer de alarmas. A continuación, se detalla la función que tiene cada elemento del panel frontal, en la imagen 4.2 se puede observar su distribución en el panel.

Figura 3. 21 Panel de mando junto con la pantalla HMI



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 3. 12 Descripción de los elementos del panel de mando





Ítem	Descripción
A	Pantalla HMI
B	Switch rotación
C	Switch extractor
D	Switch general
E	Alarma quemador

Elaborado por: Zurita Alex

3.5.3 Configuración de la HMI

La pantalla HMI posee 4 botones que pueden ser configurados como entradas digitales, por lo cual se las utilizó para el control del tiempo de cocción, lámpara, vapor y ventilador, en la siguiente tabla se muestra la asignación de cada tecla de función:

Tabla 3. 13 Asignación de las teclas de función de la pantalla HMI

Tecla de función	Imagen	Descripción
F1		Inicia la cuenta del tiempo de cocción.
F2		Activa la lámpara interna del horno
F3		Enciende el ventilador del horno para que la temperatura empiece a subir.
F4		Activa la electroválvula de vapor del horno.

Elaborado por: Zurita Alex

En la parte superior izquierda de la pantalla del HMI se identifica con la letra T el valor del tiempo de cocción, este valor puede ser modificado pulsando la tecla PROG, y tiene un rango máximo de 99 minutos, debajo de este valor se identifica con la letra A el valor del tiempo de cocción transcurrido desde que se ingresó el coche.

Figura 3. 22 Pantalla principal del controlador



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 3. 14 Descripción de los elementos de la pantalla principal

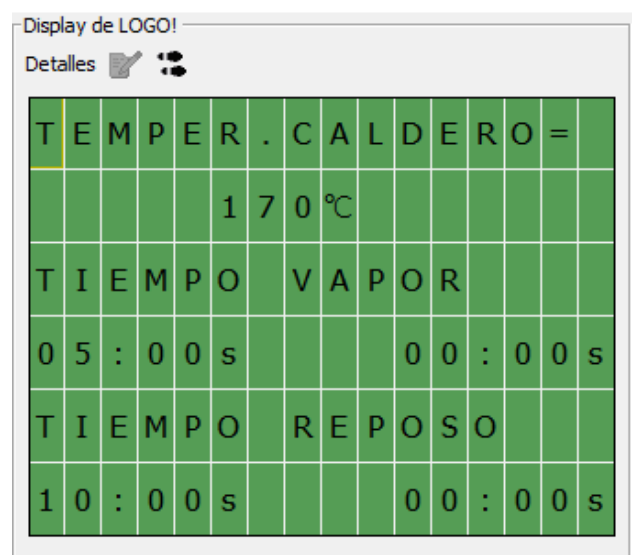
Parámetro	Descripción
A	Tiempo de cocción programado
B	Tiempo de cocción transcurrido
C	Estado de ventilador
D	Temperatura programada
E	Temperatura actual
F	Estado del motor de giro.

Elaborado por: Zurita Alex

La temperatura programada se identifica con la letra P, tiene un rango de 0°C-200°C y se puede modificar pulsando la tecla PROG, este parámetro activa o desactiva el quemador con un rango de histéresis de 3°C. El valor de temperatura actual del horno se identifica con la letra H, el fondo de pantalla se enciende de color naranja para indicar que el quemador este encendido.

En la parte inferior de la pantalla HMI se puede observar el estado del ventilador y la velocidad de giro, cuando la temperatura interna del horno alcanza a la programada, en la pantalla se muestra el porcentaje de velocidad a la que el ventilador está funcionando. Además, se indica un mensaje sobre el estado del motor que hace girar al coche.

Figura 3. 23 Pantalla secundaria del controlador.



Elaborado por: Zurita Alex

CAPÍTULO 4

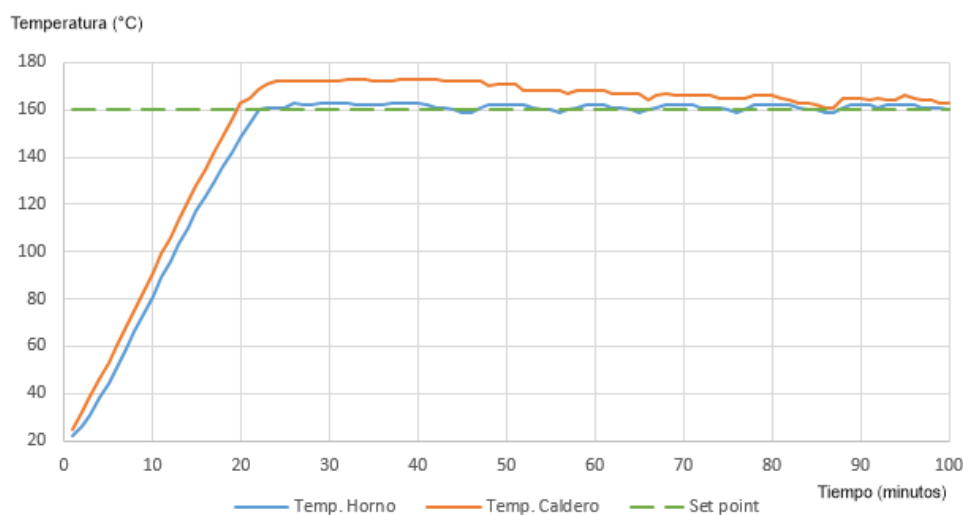
PRUEBAS Y RESULTADOS

Para validar el funcionamiento del controlador desarrollado en base a los requerimientos de la empresa FRIGOMAQCZ se realizó pruebas a distintos valores de temperatura, con el fin de mostrar las mejoras del controlador en lazo cerrado con respecto al controlador anterior de la marca DIGIMEC.

4.1 PRUEBA SIN PERTURBACIÓN

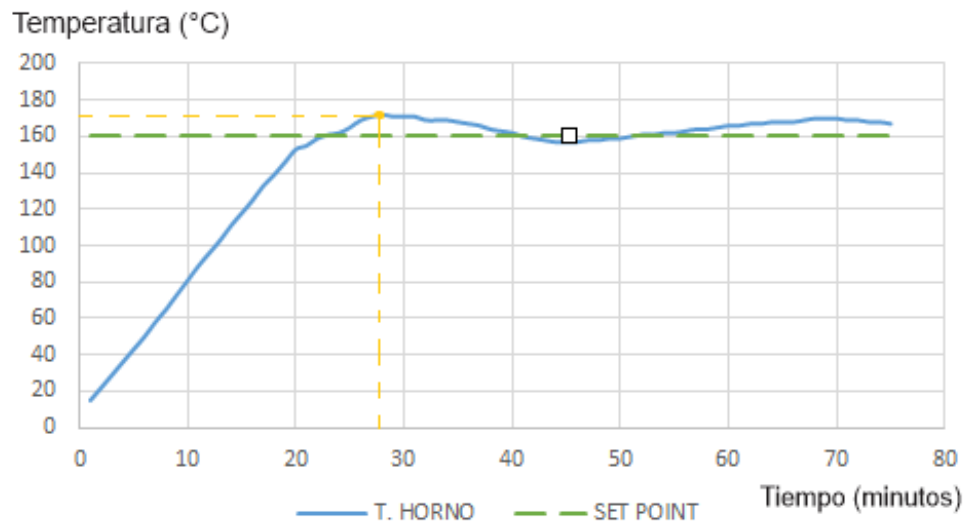
Con el fin de determinar el error de posición del controlador en lazo cerrado, se realizó pruebas con dos set point diferentes. La primera se calentó el horno desde una temperatura ambiente, hasta 160°C (figura 4.1) y se muestra la curva de temperatura del antiguo controlador (figura 4.2) donde se evidencia que el error de posición del controlador en lazo cerrado fue de 3°C y el tiempo de subida disminuyó en 3 min. Estos valores comparativos se reflejan en la tabla 4.1

Figura 4. 1 Curva temperatura set point 160°C. Controlador en lazo cerrado



Elaborado por: Zurita Alex

Figura 4. 2 Curva temperatura set point 160°C. Controlador Digimec



Elaborado por: Zurita Alex

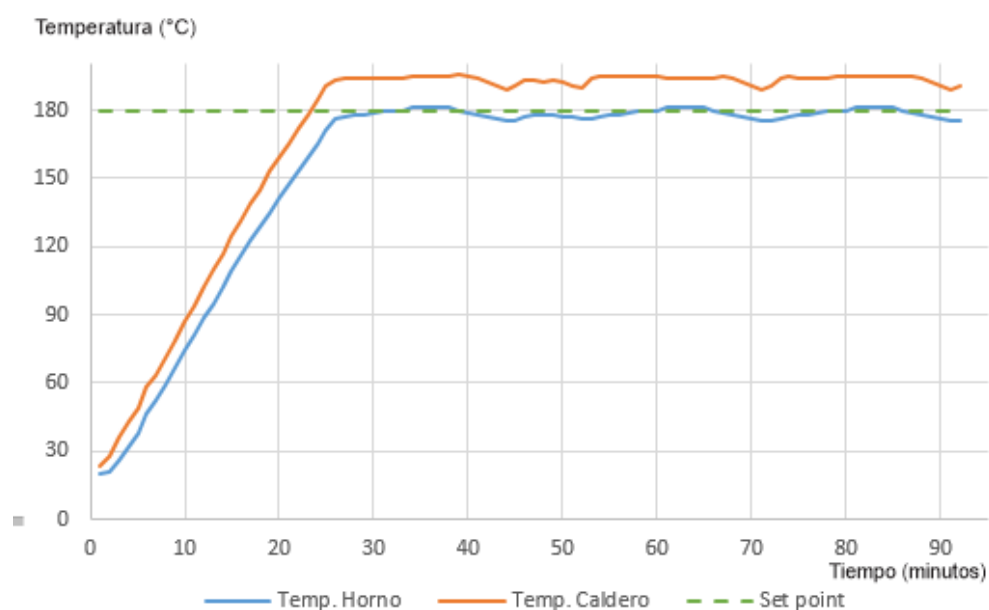
Tabla 4. 1 Tabla comparativa entre los dos controladores

Controlador	Tiempo de subida (min)	Error de posición (°C)	Error porcentual (%)
DIGIMEC	23	11	6,7
Lazo cerrado	20	3	1,87

Elaborado por: Zurita Alex

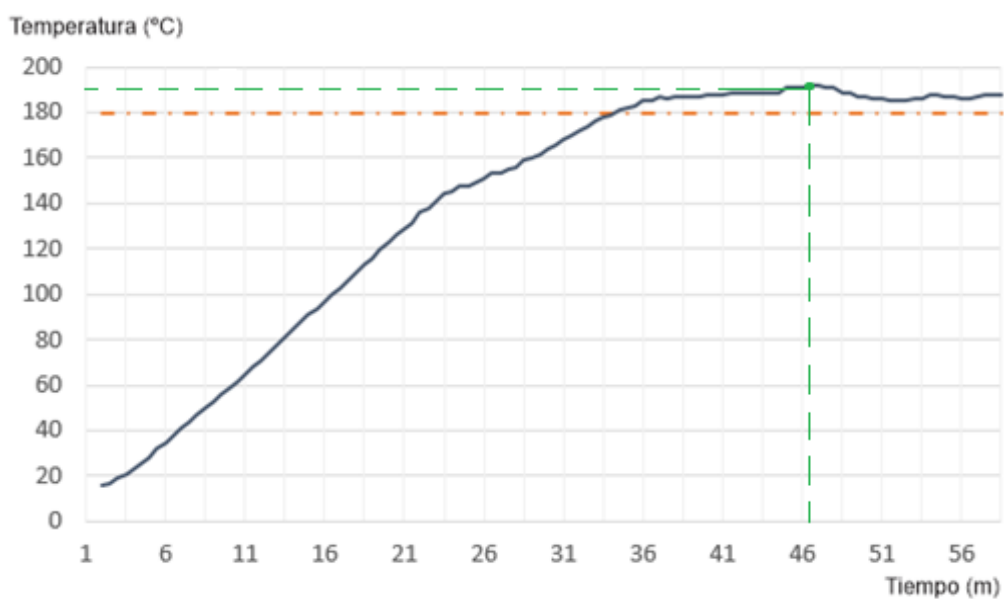
La segunda prueba se realizó calentando el horno desde la temperatura ambiente hasta a un set point de 180°C (figura 4.3), adicional se muestran la gráfica 4.4 obtenida anteriormente con el controlador Digimec. En la tabla 4.2 se realiza una comparación entre el controlador en lazo cerrado y el controlador antiguo y se nota una reducción de 5% en el error de posición, además el tiempo de subida se redujo de 33 a 31 min.

Figura 4. 3 Curva temperatura set point 180°C. Controlador en lazo cerrado



Elaborado por: Zurita Alex

Figura 4. 4 Curva temperatura set point 160°C. Controlador Digimec



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 4. 2 Tabla comparativa entre los dos controladores

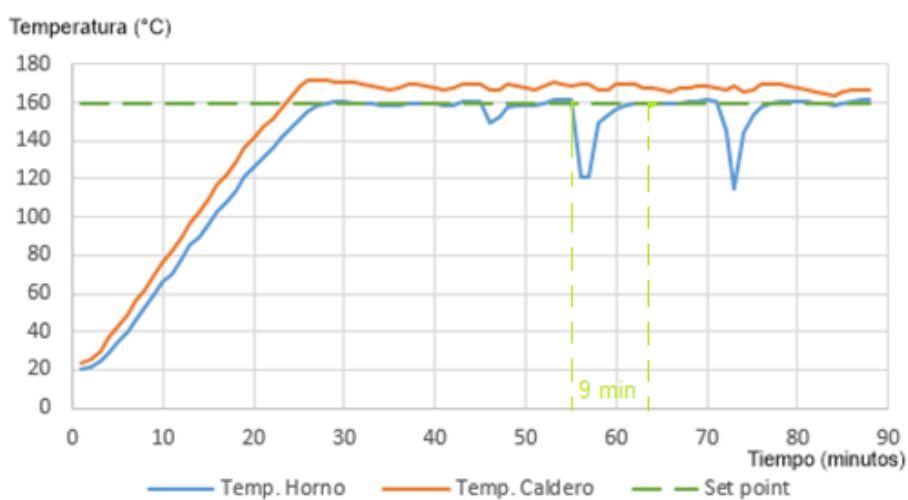
Controlador	Tiempo de subida (min)	Error de posición (°C)	Error porcentual (%)
DIGIMEC	33	12	6,7
Lazo cerrado	31	2	1,6

Elaborado por: Zurita Alex

4.2 PRUEBA CON PERTURBACIÓN POR APERTURA DE PUERTA

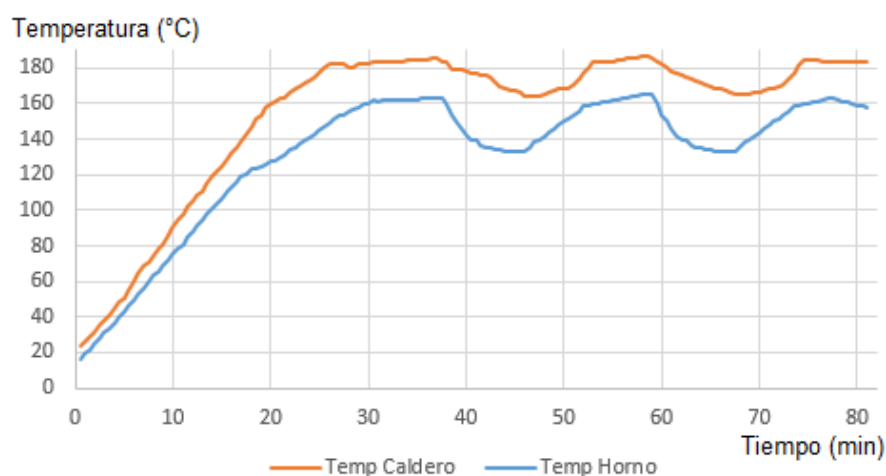
Para validar la respuesta del controlador ante perturbaciones por apertura de puerta se realizó pruebas calentando al horno hasta un set point de 160°C (figura 4.5) y se esperó un tiempo hasta que la temperatura se estabilice, luego se abrió la puerta del horno por 1 minuto, que es el tiempo aproximado que tarda el operario en ingresar el coche con producto y se evidenció una mejor respuesta dinámica del horno, ya que tardó 8 min en alcanzar el set point nuevamente. Los resultados se ven reflejados en la tabla 4.3

Figura 4. 5 Curva temperatura set point 160°C . Controlador en lazo cerrado



Elaborado por: Zurita Alex

Figura 4. 6 Curva temperatura set point 160°C . Controlador Digimec



Elaborado por: Zurita Alex

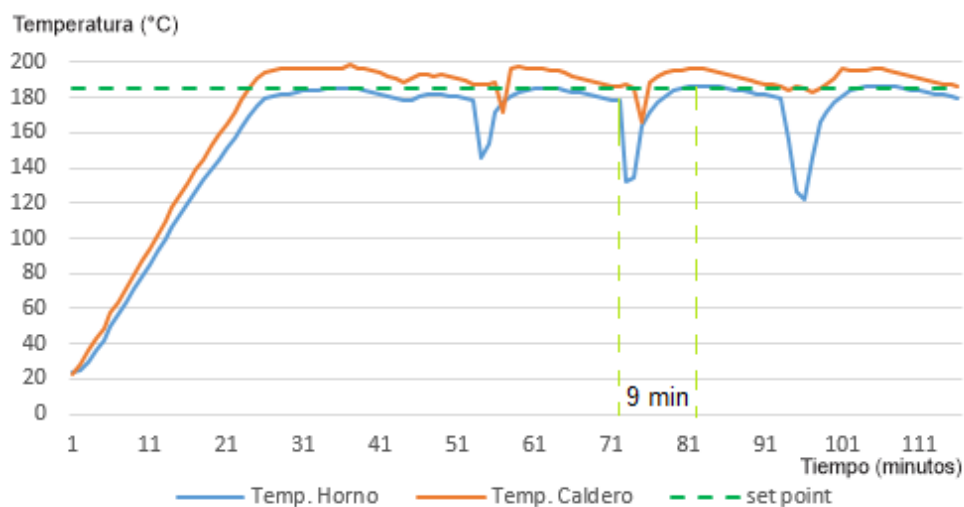
Tabla 4. 3 Tabla comparativa del tiempo de recuperación

Controlador	Temperatura que pierde (°C)	Tiempo que recupera (min)
DIGIMEC	30	13
Lazo cerrado	22	8

Elaborado por: Zurita Alex

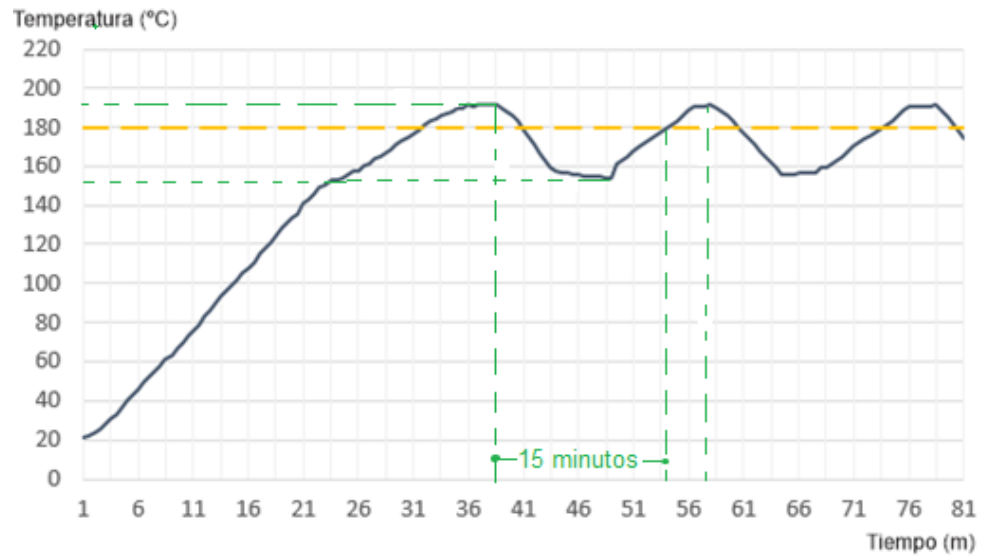
La segunda prueba se realizó a un set point de 180°C (figura 4.7), donde el tiempo que tardó el horno en alcanzar el set point fue de 27 minutos, luego de que la temperatura se estabilizó se procedió a abrir la puerta por alrededor de 2 minutos y se registró el tiempo que demora el horno en alcanzar el set point nuevamente. Los resultados se muestran en la tabla 4.4

Figura 4. 7 Curva temperatura set point 180°C. Controlador en lazo cerrado



Elaborado por: Zurita Alex

Figura 4. 8 Curva de temperatura controlador Digimec.



Elaborado por: Zurita Alex

Tabla 4. 4 Tabla comparativa del tiempo de recuperación

Controlador	Temperatura que pierde (°C)	Tiempo que recupera (min)
DIGIMEC	34	15
Lazo cerrado	27	9

Elaborado por: Zurita Alex

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se realizó la entrega del controlador de temperatura en lazo cerrado a la empresa FRIGOMACZ, en donde se cumplió con los requisitos solicitados por la empresa, como el uso de un PLC marca Siemens para el procesamiento de las señales, un HMI marca Siemens para la visualización de parámetros de temperatura, tiempo de cocción y velocidad del ventilador. Al desarrollar el controlador en lazo cerrado en base a un PLC disponible en el mercado local, se puede ofrecer un respaldo técnico inmediato ante fallas o problemas que se puedan presentar por mala manipulación, interferencias electromagnéticas o desgaste de los elementos electrónicos.

Se caracterizó el proceso de cocción de los hornos rotativos, donde determinó que el horno está conformado por varias partes que son: un quemador a diésel que genera una llama constante, un caldero de acero inoxidable en cuyo interior se produce la combustión, un ventilador que extrae el calor almacenado por el caldero, una cámara de horneo donde el aire caliente recircula, una puerta con un mecanismo que permite elevar el coche portabandejas y un sistema de poleas que hace girar al coche a baja velocidad.

El software utilizado para la programación del PLC de la marca Siemens modelo LOGO8 y del HMI Logo TDE es el Logo Soft Confort V8, la programación se la realizó utilizando bloques de funciones, la pantalla se ubicó en la parte frontal de horno y se puede visualizar los parámetros de temperatura del horno, tiempo de cocción, velocidad de giro del ventilador y alarmas por apertura de puerta o falta de diésel.

Según los datos obtenidos al implementar el controlador en el horno, el error de posición a una temperatura de 160°C se redujo al 1,87 [%], mientras que a una temperatura de 180°C el error de posición fue de 1,6 [%], además el tiempo que tarda el horno en alcanzar el set point luego de abrir la puerta se redujo en 6 minutos.

5.2 RECOMENDACIONES

Si se requiere lograr mayor precisión al momento de leer la temperatura, se podría utilizar termocuplas tipo K, y realizar una etapa de acondicionamiento en lugar del módulo analógico.

En hornos rotativos a convección se recomienda que la velocidad d giro del ventilador no sea menor a 1300 rpm, el motor trifásico usado en este proyecto es de 1750 rpm y mediante las pruebas se determinó que no debía girar a menos del 75% de su velocidad nominal

Para la puerta del horno se recomienda utilizar sensores inductivos, ya que son contruidos con un revestimiento metálico y pueden soportan las altas temperaturas que alcanza el horno.

REFERENCIAS

- Andres Camargo, E. V. (2012). *Control de temperatura de un horno mediante logica difusa*. Bucaramanga: (tesis de pregrado).
- Carballo, N. P. (Septiembre de 2016). *Manual para el participante horneado de pan*. Obtenido de Programa de Apoyo a la mejora del Clima de Negocios en Nicaragua: <https://www.mific.gob.ni/Portals/0/Documentos2Fomento/PROYECTOSFOMENTO/PRAMECLIN/I-MANUALHORNEADODELPAN.pdf>
- Castaño, H. (2013). Control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controladores PI. *Revista Politecnica ISSN 1900-2351*, 69-81.
- Escamilla, I. S. (2012). *Control de temperatura de un horno electrico mediante logica difusa*. Oaxaca: (tesis de pregrado).
- Flecha, Manuel. (29 de 06 de 2015). *Procesos y tecnicas de panificación*. Obtenido de <https://www.edu.xunta.gal/centros/cfrourense/aulavirt>
- Flores, M. (2016). *Diseño e implementacion de un sisteema automatico de control de temperatura para un horno industrila utilizado en el proceso de secado de bobinas de motores* . Quito: (tesis de pregrado).
- Javier, D., & Fabian, V. (2016). *Diseño e implentación de un sistema de entrenamiento en redes industriales utilizando tecnologia Siemens*. Quito: tesis de pregrado.
- Omar, Q., & Diego, A. (2018). *Desarrollo de un sistema de control para el horno a gas del laboratorio de Fundición de la UPS*. Quito, Ecuador: Bacherlor's tesis.
- Omega. (10 de Febrero de 2019). *Arian control Instrumentación*. Obtenido de <http://www.arian.cl/downloads/nt-003.pdf>
- Omega Engineering inc. (2019). *La importancia de la Instrumentación*. Obtenido de Medición y control de procesos define calidad en la industria <https://cl.omega.com/prodinfo/instrumentacion.html>
- Oreja, N. P. (2016). *Procesos de panaderíaa y pastelería*. Mallorca: S.A. Ediciones.
- Solé, & Creus. (2016). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Cengage.
- Valverde, N. (2001). Controlador difuso para un horno electrico resistivo. *COngreso nacional de Instrumentacion* .

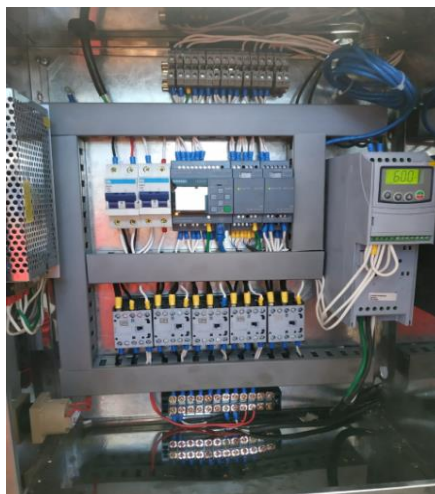
ANEXOS



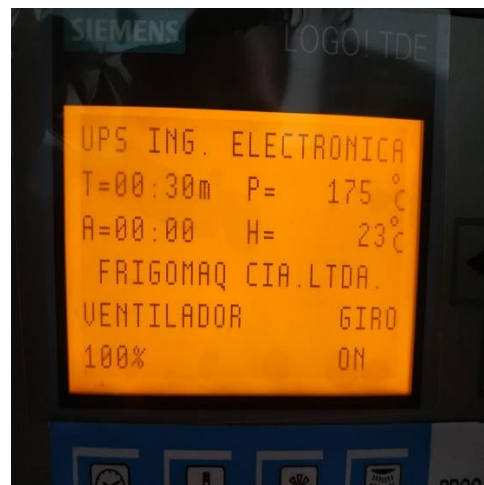
Vista frontal horno rotativo



Vista posterior



Tablero de control del horno



Pantalla HMI